

УДК 621.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ

Е.И. Грачева, А.Р. Сафин, Р.Р. Садыков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Для оценки работоспособности и технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов предлагается использовать сопротивление контактных соединений. Вероятность безотказной работы предлагается оценивать зависимостью сопротивлений контактных соединений аппаратов от числа переключений. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата увеличивается и достигает критического значения, при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

В связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные – на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения. Для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления. При этом определение количественных характеристик эффективности функционирования осуществляется методами теории вероятности и математической статистики. Совокупность полученных количественных показателей позволяет определять фактический уровень надежности контактирования, а также расширяет возможности прогнозирования оценок работоспособности при проектировании.

В предлагаемой статье разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений и вероятности безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

**Ключевые слова:** функционирование, электроснабжение, вероятностные характеристики, электросеть, низковольтные аппараты, надежность.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-13-21

## RESEARCH AND EVALUATION OF FUNCTIONAL PARAMETERS OF LOW VOLTAGE DEVICES

E.I. Gracheva, A.R. Safin, R.R. Sadykov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** To assess the operability and technical condition of low-voltage devices, it is proposed to use the resistance of contact connections. The probability of failure-free operation is proposed to be evaluated by the dependence of the resistance of the contact connections of the apparatus on the number of switching operations. As a result of wear, the initial value of the contact resistance of the switching device increases and reaches a critical value at which the switching device fails.

*Due to the fact that in the process of research there are both complete contact failures and short-term switching of only one time, the contact resistance is exceeded by the contact resistance of the threshold value. For magnetic starters, circuit breakers and contactors, based on the results of the experimental studies carried out, in order to achieve the critical resistance value of the apparatus, an average of three times the initial resistance. At the same time, the quantitative characteristics of the functioning efficiency are determined by the methods of probability theory and mathematical statistics. The set of the obtained quantitative indicators allows to determine the actual level of reliability of contacting, and also extends the possibility of predicting performance ratings in the design.*

*In the present article, a method for the complex evaluation of the efficiency of low-voltage apparatus has been developed and the laws of the change in the resistance of contact connections and the probability of failure-free operation of low-voltage switching devices have been revealed, depending on the operating conditions.*

**Keywords:** *functioning, electricity, probabilistic characteristics, power grid, low-voltage devices, power loss.*

Общеизвестно, что не все технические параметры серийных аппаратов приводятся в паспортных данных. В частности, не всегда указывается сопротивление их силовой цепи, сопротивления значительной части элементов электрических аппаратов.

Скорость износа контактов при коммутации определяет уровень надежности работы аппаратов. Основными факторами, которые непосредственно определяют скорость износа контактов и, следовательно, возможность возникновения отказа являются: величина тока и напряжения; характер нагрузки (с увеличением индуктивности коммутационной цепи износ контактов увеличивается); материал контактов, в том числе их размеры, форма, однородность структуры; время и амплитуда вибрации контактов в момент замыкания, жесткость контактных пружин и др. Все эти факторы функционально взаимосвязаны с тепловыми, электрическими и физико-техническими параметрами контактных материалов.

Анализ функциональных взаимосвязей указанных факторов и параметров, их систематизация дают возможность обосновать правомерность принятия некоторых критериев, определяющих показатели работоспособности контактных систем низковольтных электрических аппаратов. В качестве таких критериев могут быть представлены характерные зависимости изменения провала, суммарной высоты и массы контактов, сопротивления контактов от количества циклов.

Работоспособность контактов предложено оценивать зависимостью сопротивления контактных соединений аппаратов от числа переключений. Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $R_0$  увеличивается и достигает критического значения  $R_{кр}$ , при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

В связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные – на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения [1; 2]. При этом для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления:

$$R_{кр} = a \cdot R_0, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от типа аппарата [3; 4].

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $R_0$  вычисляется на основании выражений, представленных в работе [4].

При этом сопротивление контактов можно рассматривать как случайную функцию количества коммутационных циклов  $r(z)$  [3]:

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz, \quad (2)$$

где  $r_0$  – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата;  $v$  – скорость изменения сопротивления контактов.

Ниже представлена методика оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. Результаты экспериментальных исследований [4] свидетельствуют о том, что изменение сопротивления контактов аппарата от количества коммутационных циклов можно с достаточной точностью аппроксимировать искомой зависимостью способом наименьших квадратов.

В соответствии с изложенным выражение (2) принимает вид:

$$r(z) = r_0 + vz. \quad (3)$$

Параметры  $r_0$  и  $v$  с достаточной степенью достоверности можно считать некоррелированными (независимыми) [4], так как  $r_0$  определяется качеством производственного процесса, а величина  $v$  для конкретной конструкции аппарата – совокупностью факторов эксплуатационного характера.

Установлено [2], что эмпирические функции сопротивлений контактов аппаратов аппроксимируются нормальным законом распределения. Функция  $r(z)$  в этом случае показана как функция веерная случайная. Начальная ордината принимается равной  $r_{0,ср}$ .

Таким образом, положение каждой реализации зависит от одной случайной величины – углового коэффициента  $v$ :

$$r_{0,ср} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{м.в}, \quad (4)$$

где  $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$  – выборочная средняя величина;  $\sigma_{м.в} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}$  – среднее

квадратическое отклонение малой выборки.

Коэффициент  $k$  зависит от количества испытанных образцов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ , с которой гарантируется получение  $r_{0,ср}$ .

Для конкретной коммутационной нагрузки скорость изменения сопротивления контактов зависит от большого количества факторов [5–8]:

- а) сопротивление контактов зависит от характера нагрузки;
- б) сопротивление может изменяться при переходе от одной контактной пары к другой, а также самопроизвольно при измерениях сопротивления одной и той же контактной пары в весьма широком диапазоне;
- в) кроме того, важно учитывать величину конечного и начального нажатий, вибрации, скорости движения, свойств материала, формы и размеров контактов, а также число манипуляций по переключению контактов и обмоток аппарата, изменение напряжения и тока. Таким образом, скорость изменения сопротивления контактов является вероятностно-статистической величиной.

Распределения указанных параметров, как показывает их статистическое исследование [2], описываются нормальными законами. Следовательно, и функция (скорость изменения сопротивления контактов) от аргументов, распределенных по нормальному закону, может быть принята также распределенной по аналогичному закону.

Поэтому для определения средней скорости изменения сопротивления всей генеральной совокупности аппаратов может быть использован изложенный метод [3].

Характеристика веерной случайной функции имеет вид

$$r_{\text{ср}}(z) = r_{\text{о.ср}} + v_{\text{ср}}z. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы контактов низковольтных коммутационных аппаратов за определенное количество коммутационных циклов находится по выражению

$$P(z) = 1 - F(z), \quad (6)$$

где  $F(z) = \int_0^z f(z)dz$  – вероятность ненадежной работы контактов (интегральный закон

распределения отказов);  $f(z)$  – плотность вероятности безотказно выполненных коммутаций (дифференциальный закон распределения отказов).

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} f(r)dr. \quad (7)$$

Нижний предел интегрирования  $r_0$  определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления  $r_{\text{кр}}$  всей выборки значений сопротивлений аппаратов.

Так как текущие значения  $r(z)$  распределяются по нормальному закону, то

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{кр}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r - r_{\text{ср}})^2}{2\sigma_r^2}\right] dr, \quad (8)$$

где  $r_{\text{ср}}$  – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов;  $\sigma_r$  – среднее квадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций средние квадратические отклонения практически линейно зависят от времени (для коммутационных аппаратов можно считать от количества циклов), т.е.

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (9)$$

где  $\sigma_v$  – среднее квадратическое отклонение углового коэффициента  $v$ .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций  $f(z)$  необходимо продифференцировать выражение (7) по количеству циклов. Вместо  $r$  и  $\sigma_r$  подставляются значения  $r(z)$  и  $\sigma_r(z)$  из соотношений (1) и (7). Значение  $dr/dz$  представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (2)

$$dr = vdz, \text{ или } dr = \frac{r - r_{\text{о.ср}}}{z} dz. \quad (10)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v z^2} \left\{ 3\sigma_{r_0} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{r_0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{\text{ср}}}{\sigma_v}\right)^2\right] + \right. \\ \left. + (r_{\text{кр}} - r_{\text{о.ср}}) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{v_{\text{ср}}}{\sigma_v} - \frac{r_{\text{кр}} - r_{\text{о.ср}}}{\sigma_v z}\right)^2\right] \right\}. \quad (11)$$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно  $S$  и  $S_1$ , т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{\text{ср}}}, \quad (12)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{o.c.p}}, \quad (13)$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{o.c.p}}{v_{cp}}, \quad (14)$$

$$\theta_2 = \frac{r_{kp} - r_{o.c.p}}{v_{cp}}. \quad (15)$$

Таким образом,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (16)$$

Вероятность безотказной работы контактов определяется по выражению

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} dz. \quad (17)$$

На сегодняшний момент развитие имитационных систем позволяет решать комплекс задач по моделированию сложных систем, в том числе и по оценке функциональных параметров низковольтных аппаратов. Применение систем моделирования позволяет снизить затраты на создание испытательного образца и оценить степень эффективности применения того или иного варианта схемы управления [9; 10].

Некоторые изготовители коммутационного оборудования применяют хорошо зарекомендовавшие себя программы и одновременно стремятся обеспечивать обмен исходными данными и результатами расчетов между моделями разных систем. Для этого используют интерфейсы, позволяющие реализовать обмен данными между моделями механических и регуляционных процессов уже на первой стадии разработки. Это дает возможность своевременно получать как можно более точную информацию о поведении коммутационной системы и непосредственно сопоставлять его с поведением физической системы [11–13].

Для моделирования и оценки функциональных параметров коммутационных систем низковольтных электрических аппаратов использовались блоки программы *Matlab* из библиотеки *Simulink*.

На рис. 1 показана модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (17). Для задания необходимых значений используются блоки *Constant*, для совершения вычислительных

операций блоки *Fcn* (функция), *Product* (умножение) и *Sum* (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} ; \quad (18)$$

$$f(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} ; \quad (19)$$

$$f(u_2) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{Z}}{s} \right)^2 ; \quad (20)$$

$$f(u_3) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_2}{Z}}{s} \right)^2 ; \quad (21)$$

$$f(u_4) = \frac{\theta_2}{s} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_2}{Z}}{s} \right)^2 \right]. \quad (22)$$

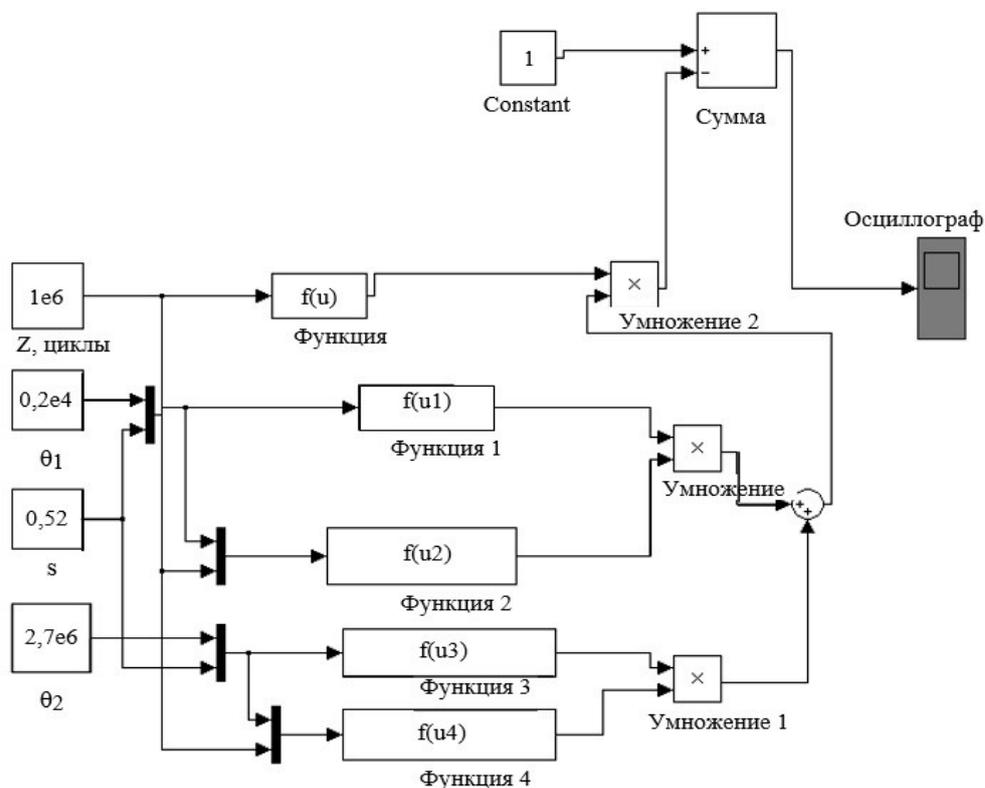


Рис. 1. Модель для расчета вероятности безотказной работы низковольтных аппаратов

На рис. 2 показаны, в соответствии с предлагаемым алгоритмом, зависимости изменения сопротивления контактов и вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии с номинальными токами 40; 63 и 80 А от количества коммутационных циклов. Аналогичные зависимости могут быть получены для автоматических выключателей и контакторов низкого напряжения.

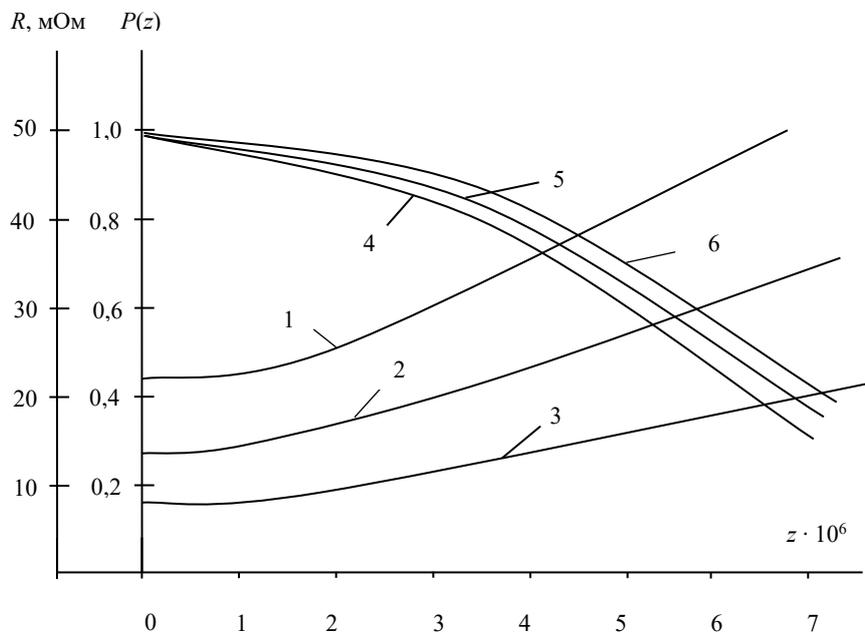


Рис. 2. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 1 –  $I_n = 40$  А; 2 –  $I_n = 63$  А; 3 –  $I_n = 80$  А; зависимость вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии ПМЛ от количества коммутационных циклов: 4 –  $I_n = 40$  А; 5 –  $I_n = 63$  А; 6 –  $I_n = 80$  А

### Выводы

1. Проведен комплексный анализ теоретических и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов.

2. Проведена оценка величины сопротивлений контактных систем аппаратов с использованием нормального закона распределения.

3. В результате экспериментальных исследований предложен критерий оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого выступает сопротивление контактных соединений, позволяющий учесть динамику изменения потерь мощности, и установлены коэффициенты кратности (превышения) значения сопротивления контактов по величине их допустимого перегрева относительно номинальных значений.

4. Разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

### Литература

1. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вести вузов Черноземья. 2013. № 2.

2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Обработка статической информации с целью выявления законов изменения параметров оборудования цеховых сетей // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 2.
3. Грачева Е.И., Копытова Н.А. Анализ структуры систем цехового электроснабжения предприятий машиностроительной отрасли // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6.
4. Грачева Е.И., Сафин А.Р. Реализация метода прогнозирования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов // Промышленная энергетика. 2011. № 11.
5. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Оценка эффективности безотказности систем // Вести вузов Черноземья. 2013. № 1.
6. Шпиганович А.Н. Аспекты расчетов параметров электротехнических установок по условиям подobia // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2.
7. Шпиганович А.А. Научно-технические основы анализа функционирования систем электроснабжения. Липецк: ЛГТУ, 2012.
8. Шпиганович А.А. Современные состояния вопросов безотказности систем электроснабжения. Липецк: ЛГТУ, 2012.
9. Конохова Е.А. Электроснабжение: учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2014.
10. Конохова Е.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.
11. Akagi H. New Trends in Active filters for Power Conditioning. IEEE Transactions on industry applications. 1996. No. 6.
12. Yu-Long C., Hong W., Jing-Gin L. Simulation and reliability analysis of shunt active power there. Journal of Zhejiang University Science. 2007. No. 3.
13. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter. Ecti transactions on electrical end, communications. 2006. No. 1.

#### **Авторы публикации**

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: grachieva.i@bk.ru.

**Сафин Альфред Робертович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Садыков Руслан Рустемович** – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ru059@mail.ru.

#### **References**

1. Shpiganovich A.A. Analiz vliyaniya veroyatnostnyh parametrov ehlektrooborudovaniya na ehffektivnost' funkcionirovaniya sistem ehlektrosnabzheniya // Vesti vuzov Chernozem'ya. 2013. No. 2.
2. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Obrabotka staticheskoy informacii s cel'yu vyyavleniya zakonov izmeneniya parametrov oborudovaniya cekhovyh setej // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ya. 2016. No. 2.
3. Gracheva E.I., Kopytova N.A. Analiz struktury sistem cekhovogo ehlektrosnabzheniya predpriyatij mashinostroitel'noj otrasli // Problemy ehnergetiki. 2016. No. 5–6.
4. Gracheva E.I., Safin A.R. Realizaciya metoda prognozirovaniya parametrov nadezhnosti nizkovol'tnyh kommutacionnyh apparatov // Promyshlennaya ehnergetika. 2011. No. 11.

5. SHpiganovich A.N., SHpiganovich A.A. Ocenka ehffektivnosti bezotkaznosti sistem // Vesti vuzov Chernozem'ya. 2013. No. 1.

6. SHpiganovich A.N. Aspekty raschetov parametrov ehlektrotekhnicheskikh ustanovok po usloviyam podobiya // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2008. No. 2.

7. SHpiganovich A.A. Nauchno-tehnicheskie osnovy analiza funkcionirovaniya sistem ehlektrosnabzheniya. Lipeck: LGTU, 2012.

8. SHpiganovich A.A. Sovremennyye sostoyaniya voprosov bezotkaznosti sistem ehlektrosnabzheniya. Lipeck: LGTU, 2012.

9. Konyuhova E.A. EHlektrosnabzhenie: uchebnik dlya vuzov. Moskva: Izdatel'skij dom MEHI, 2014.

10. Konyuhova E.A. Nadezhnost ehlektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij. M.: NTF «EHnergoprogress», 2001.

11. Akagi H. New Trends in Active filters for Power Conditioning. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 1996. No. 6.

12. Yu-Long C., Hong W., Jing-Gin L. Simulation and reliability analysis of shunt active power there. Journal of Zhejiang University Science. 2007. No. 3.

13. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of a Novel Control Strategy for Shunt Active Filter. Ecti transactions on electrical end, communications. 2006. No. 1.

#### **Authors of the publication**

***Elena Gracheva*** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Alfred Safin*** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Ruslan Sadykov*** – postgraduate student, Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

***Поступила в редакцию***

***23 ноября 2017 г.***